

## 小型超音速飛行実験機のピッチおよびヨーレートによる動的空力特性

著者	塩野 経介, 石上 幸哉, 溝端 一秀, 東野 和幸, 新井 隆景
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2015
ページ	62-66
発行年	2016-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009147">http://hdl.handle.net/10258/00009147</a>

# 小型超音速飛行実験機のピッチおよびヨーレートによる動的空気特性

○塩野 経介 (航空宇宙システム工学コース 学部4年)  
石上 幸哉 (航空宇宙総合工学コース 博士前期1年)  
溝端 一秀 (航空宇宙システム工学ユニット 准教授)  
東野 和幸 (航空宇宙機システム研究センター 教授)  
新井 隆景 (大阪府立大学 教授)

## 1. はじめに

M2011 空力形状を有する小型超音速飛行実験機 (愛称オオワシ) の飛行性能予測のための 6 自由度飛行経路解析[1]や, 自律的誘導制御系の設計のためには, 姿勢変化速度 (角速度) による空力特性, すなわち動的空気特性データが必要である. これまで 6 自由度飛行経路解析では静的風洞試験による空力係数・微係数と, 理論解析による動的空気特性データを用いてきた. しかし, オオワシのクランクトアロー主翼周囲の流れでは大規模渦構造が卓越していることから, 翼幅方向に均一な流れ場を仮定する従来の理論解析では不十分と推察される. そこで本研究では, M2011 空力形状におけるピッチおよびヨー運動による動的空気特性を風洞試験によって明らかにする.

## 2. 試験方法

### 2-1. 試験装置

風試模型をピッチ又はヨー軸回りに往復運動させることができ, かつ風試模型の自重によるモーメントにも耐えうる機構を新たに構築する必要がある. そこで, 図1のように, 模型のロール角を 90 度変えることによってヨー, ピッチそれぞれの方向の角速度を与えられるようにする. また, 図2のように駆動回転軸 (赤緯軸) が実機の重心相当位置を通るように模型およびスティンダを配置し, ロータリーアクチュエータで赤緯軸を往復回転運動させる. 赤緯軸の回転角を計測するために, 赤道儀ケーシング内部にポテンシオメータを設置する.

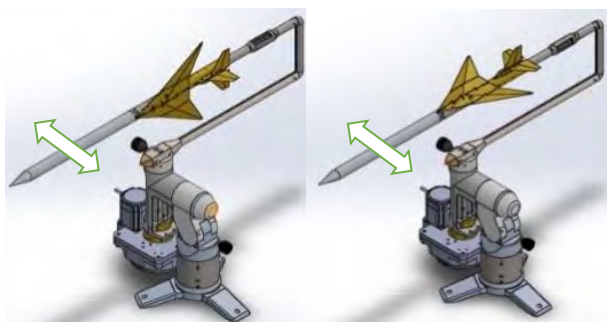


図1 ピッチ・ヨー駆動装置の概観

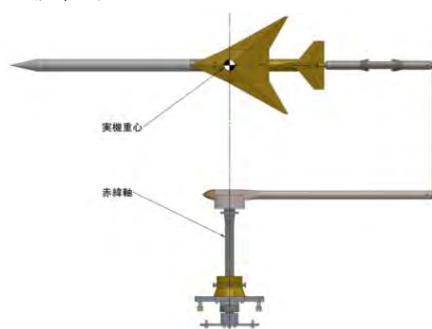


図2 駆動装置の部分断面

### 2-2. 試験方法

この駆動装置を大阪府立大学の回流式亜音速風洞に設置して, 模型を駆動しながら通風し, 六分力内装天秤によって空気力を計測・解析する. その結果を理論解析と比較検証する. 使用する風試模型は M2011 Nose-C 形状であり, 主翼・尾翼に舵角は付けない. ピッチ駆動においては横滑り角  $\beta$  を  $0^\circ, +5^\circ, +10^\circ$  の 3 通りとし, ヨー駆動においては迎角  $\alpha$  を  $0^\circ, +5^\circ, +10^\circ, +15^\circ, +20^\circ$

の5通りとする。さらにロータリーアクチュエータの駆動周波数を 300 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 2880 Hz の5通りとする。通風流速は約 20 m/sec とし、毎回の通風流速を熱線風速計で計測する。

風試の手順は以下の通りである。

- ① 駆動装置のアームに風試模型を取り付け、赤道儀のピッチ・ヨー角を調整する。
  - ② ロータリーアクチュエータの運転条件（角速度、加減速レート、回転量等）を設定する。
  - ③ ひずみアンプから電気較正信号を発生させて収録する（電気較正）。
  - ④ 無風状態でロータリーアクチュエータを駆動させ、天秤信号を収録する（予行運転）。
  - ⑤ すみやかに風洞を起動し、流速がおおむね一定になったらロータリーアクチュエータを駆動させ天秤信号を収録する（通風試験）。
  - ⑥ 通風終了後、模型の状態を確認する。
  - ⑦ 得られた③～⑤データを PC に保存し、解析する。
- ②から⑦を繰り返し、試験を行う。

### 3. 風試結果と考察

ピッチ駆動を例にとり、データの解析方法を以下に示す。

まず、図3に迎角 $\beta = 0$ 、駆動周波数 $f=1000\text{Hz}$ の条件で試験した際の収録データを示す。上記手順の③、④、⑤を通してデータ収録しており、それぞれ図中の A, B, C に対応する。凡例中の Move はロータリーアクチュエータのアクティブ/非アクティブを示すものであり、B, C の箇所で Move が山となっていることによってロータリーアクチュエータのアクティブ（駆動中であること）が示されている。

次に、C の箇所で計測された力・モーメントから模型の重力成分および遠心力成分を取り除くことによって、模型にはたらく空気力データが得られる。このために必要な模型の重心位置は、模型の 3DCAD モデルにおいて推定する。補正されたピッチ駆動のデータ解析例を図4に示す。縦軸に補正されたピッチングモーメント係数を取り、横軸に迎角 $\alpha$ をとり近似直線を描くと、近似直線の傾きが静的微係数 $C_{m\alpha}$ を表し、縦軸切片が動的なピッチングモーメント微係数 $C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}\hat{q}$ を表す。

さらに、上記で得られた動的なピッチングモーメント微係数 $C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}\hat{q}$ を縦軸にとり、無次元化角速度 $\hat{q}$ を横軸にとったグラフを図5に示す。横滑り角 $\beta = 0, 5, 10^\circ$ の場合の近似直線を青、赤茶、緑で示しており、原点を通る赤直線は理論値を表している。これらの直線の傾きが動的微係数 $C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}$ を表しており、風試結果は理論値に概ね良く一致している。ヨー駆動時のデータもピッチ駆動と同様に解析できる。

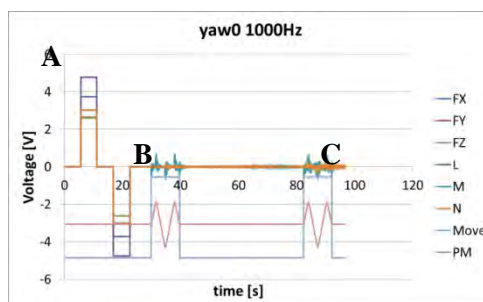


図3 風洞試験で取得されるデータの例 ( $\beta = 0, f=1000\text{Hz}$ ) .

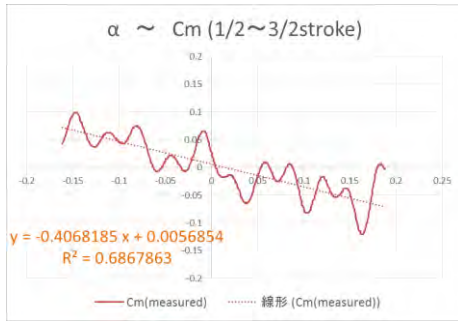


図4 ピッチングモーメント係数の解析例

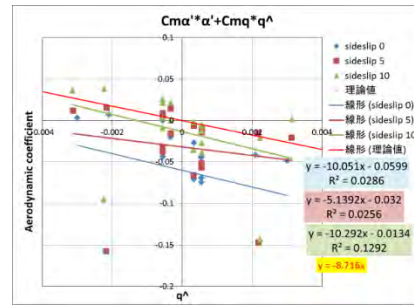


図5  $C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}\hat{q}$  の解析

このようにして得られた静的微係数と動的微係数を図6から図12に示す。まず静的微係数については、図6より、 $C_{m\alpha}$ は、低角速度域で静的風試値より小さく、高角速度域では符号が変わってピッチング静安定が失われる。図7より、 $C_{l\beta}$ は、迎角 $\alpha = 0^\circ$ の時静的風試値に良く一致しているが、迎角が増えると $C_{l\beta}$ はマイナス側に大きくなり上反角効果が強まる。図8より、風見安定を表す $C_{n\beta}$ は、通常正であるが実験値はすべて負となった。図9より、 $C_{y\beta}$ はピッチ角0の時静的風試データに近い値となっている。

次に動的微係数については、図5中の近似直線の傾きである $C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}$ は理論値とほぼ一致しており、横滑り角によってあまり変化しないことがわかる。図10において、それぞれの近似直線の傾き $C_{lr}$ は理論値より非常に大きい。ただし、この微係数の値を風洞試験によって求めることは非常に難しいと言われている[4]。図11において、それぞれの近似直線の傾き $C_{nr}$ は正となっていることから、ヨー運動を増幅させる効果が現れている。図12において、それぞれの近似直線の傾き $C_{yr}$ は $\alpha = 0^\circ$ の時理論値に近いが、迎角が大きくなると非常に大きくなる。これらの $C_{lr}$ 、 $C_{nr}$ 、 $C_{yr}$ を迎角について整理したものが図13である。迎角10度までは、 $C_{lr}$ 、 $C_{nr}$ 、 $C_{yr}$ は増加傾向にありすべて理論値より大きい。さらに、 $C_{yr}$ は迎角15度で極大となっている。

最後に理論解析および風試による微係数の値の一覧を表1に示す。

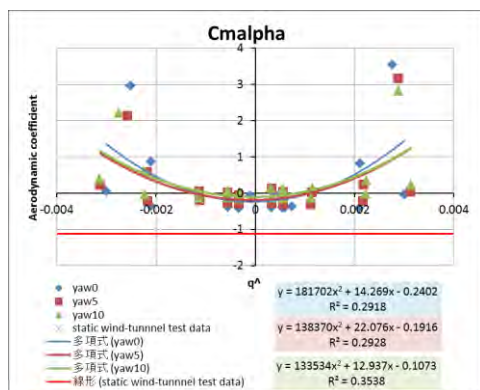


図6  $C_{m\alpha}$  vs  $\hat{q}$

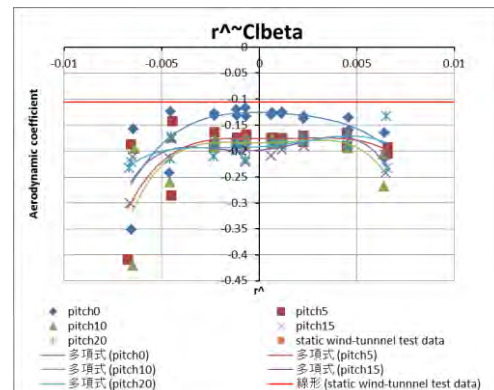


図7  $C_{l\beta}$  vs  $\hat{r}$

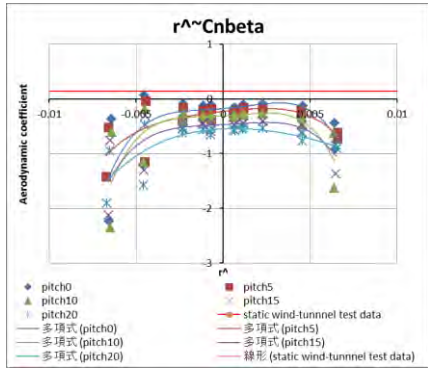


図 8  $C_{n\beta}$  vs  $\hat{r}$

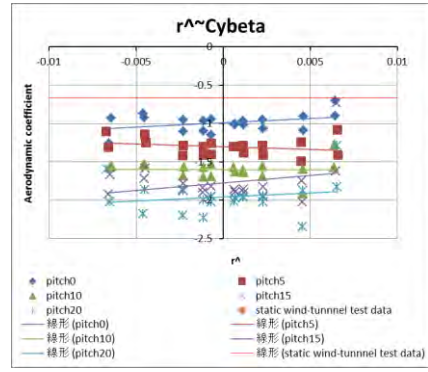


図 9  $C_{y\beta}$  vs  $\hat{r}$

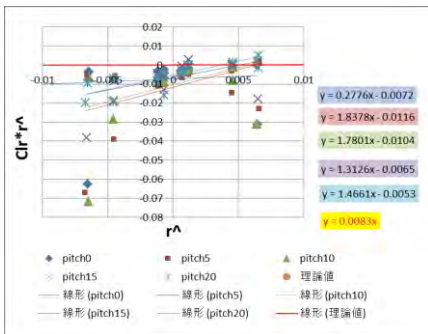


図 10  $C_{l_r}$  vs  $\hat{r}$

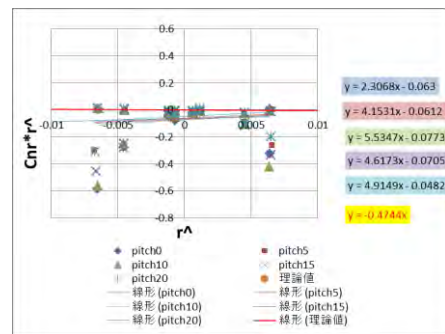


図 11  $C_{nr}$  vs  $\hat{r}$

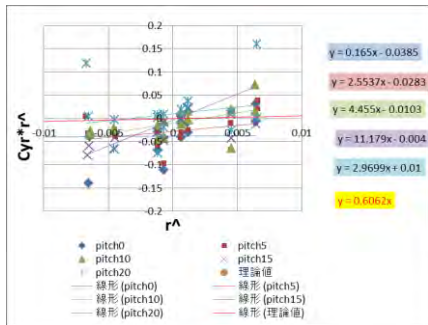


図 12  $C_{y_r}$  vs  $\hat{r}$

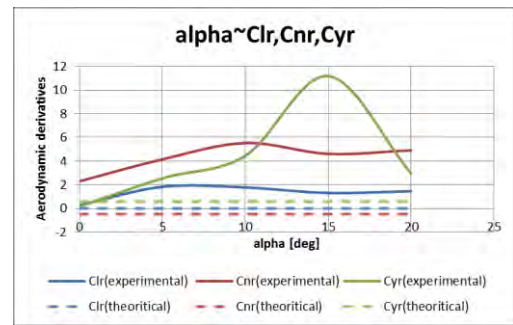


図 13  $C_{l_r}, C_{nr}, C_{y_r}$  vs  $\alpha$

表 1 ピッチ・ヨー角速度による空力微係数の理論値と風試結果の比較 ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ )

Derivative		Theory	Experiment
$C_{m\alpha}$	Static	-1.1158	-0.02166
$C_{m\dot{\alpha}} + C_{mq}$	Dynamic	-8.716	-4.779
$C_{l\beta}$	Static	-0.1060	-0.1547
$C_{n\beta}$	Static	0.1461	-0.3702
$C_{y\beta}$	Static	-0.6245	-0.9907
$C_{l_r}$	Dynamic	0.008304	0.04880
$C_{nr}$	Dynamic	-0.4743	-0.2486
$C_{y_r}$	Dynamic	0.6062	0.2944

#### 4. まとめ

M2011 形状の動的空力特性について、ピッチ・ヨー駆動装置を設計製作し亜音速風洞試験を実施して、ピッチ・ヨーに関する空力微係数を計測・推算した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) ピッチ角速度を与えるとピッチング静安定が劣化する。
- (2)  $C_{n\beta}$ ,  $C_{lr}$ は、理論値と大きく異なる結果となった。
- (3) そのほかのピッチ・ヨーに関する微係数は理論値と概ね良く一致した。

これらのことから、本研究のデータ解析手法は概ね妥当であると言える。また、角速度の大きい場合に、ノイズや模型の振動によって計測データのばらつきが大きくなった。今後は再現性確認のために風試を追加実施すると共に、高精度な重力・遠心力補正のための模型重心位置の正確な計測や、模型周囲の流れ場の可視化による流体力学的メカニズムの解明等を行う必要がある。

#### 参考文献

- [1] 近藤賢，溝端一秀，「小型超音速飛行実験機の飛行性能の予測」，室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書 2013.
- [2] 石上幸哉，溝端一秀，「室蘭工大の小型超音速飛行実験機の動的空力特性」，室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書 2014.
- [3] 加藤寛一郎，大屋昭男，柄沢研治，「航空機力学入門」，東京大学出版会，2009.
- [4] Courtland D. Perkins, and Robert E. Hage, AIRPLANE PERFORMANCE STABILITY AND CONTROL, JOHN WILEY AND SONS, p.428.